

Terre plastiche stabilizzate a calce: valutazione delle caratteristiche meccaniche

Ugo Sergio Orazi¹, Michele Orazi¹, Angelo Canziani², Walter Borghi³.

¹ Laboratorio Geomeccanico, via Corpo Italiano di Liberazione 42, Pesaro, labgeomeccanico@libero.it, tel. 0721-283733, fax. 0721-280273. ² Gruppo Unicalce, Lecco, dir@unicallce.it. ³ Studio Geocon, Fano.

Plastic soils stabilised with lime: evaluation of the mechanical characteristics

ABSTRACT: This work is about a laboratory test aiming at defining and comparing the behaviour and the main mechanical characteristics of a plastic soil (known mineralogical composition) before and after its stabilisation with 4% CaO. The stabilised soil was used to construct an embankment during the works for the “strada interquartiere” in Pesaro town. The mechanical parameters evolution depending on cured time was determined with CBR and unconfined compression tests on samples, which were packed with compaction energy of 2685 kJ/m³. The “final” change of dimension and shape of the material boundary surface, as well as the shear modulus and the parameters of shear resistance were valued after pozzolanic reaction thanks to incremental loading oedometer and isotropically consolidated undrained triaxial tests. The resistance parameters were then compared with the results obtained from samples tested, at the same condition, using the direct shear test.

Key terms: stabilisation; effective vertical yield stress; boundary surface; shear modulus.

Termini chiave: stabilizzazione; superficie di stato limite, modulo di taglio; tensione verticale efficace di plasticizzazione.

Riassunto

Il presente lavoro illustra uno studio di laboratorio effettuato con lo scopo di definire e confrontare il comportamento e le principali caratteristiche meccaniche di un terreno plastico (composizione mineralogica nota) prima e dopo la sua stabilizzazione con il 4% di CaO.

Tale terra è stata utilizzata per la costruzione di un rilevato nell’ambito dei lavori per la realizzazione della “strada interquartieri” nel comune di Pesaro.

L’evoluzione dei parametri meccanici in funzione del tempo di maturazione è stata determinata sottoponendo i provini, confezionati mediante costipamento con energia pari a 2685 kJ/m³, a prove di penetrazione CBR e di compressione non confinata.

A reazioni pozzolaniche avvenute, tramite prove di compressione edometrica ad incrementi di carico (I.L.) e triassiale consolidate isotropicamente non-drenate (C.I.U.), è stata valutata la “definitiva” variazione di forma e dimensione che ha subito la superficie di stato limite del materiale così come la rigidità e i parametri di resistenza al taglio.

I parametri di resistenza sono stati poi confrontati con quelli ottenuti su provini testati, alle medesime condizioni, con l’apparecchio di taglio diretto.

Introduzione

Un’alternativa, attualmente praticata in Italia, all’impiego di inerti pregiati per la costruzione di opere

varie è la tecnica di stabilizzazione delle terre con la calce aerea e/o i leganti idraulici, attraverso la quale è possibile trasformare terre aventi scadenti qualità meccaniche, in validi materiali per la costruzione dei diversi elementi che compongono il corpo stradale.

In questo articolo, dopo una breve introduzione sull’argomento, verrà illustrato uno studio di laboratorio su un terreno, costituito da una miscela di quarzo, feldspati, calcite, illite e smectite con tracce di clorite e dolomite, trattato con il 4% di CaO e utilizzato per la costruzione di un rilevato stradale (“strada interquartieri” - Pesaro).

Gli aspetti chimici del trattamento con calce aerea

I materiali naturali trattabili con la calce aerea sono le terre classificabili nei gruppi A7, A6, A2-6 e A2-7 della norma UNI 10006, che presentano quindi un indice di plasticità (PI) maggiore del 10%.

Miscelando intimamente la calce aerea con le terre compatibili si verificano diversi fenomeni chimico-fisici descritti in seguito.

Riduzione del contenuto in acqua naturale delle terre

La calce aerea viva, a contatto con l’acqua contenuta nelle terre da trattare, si trasforma in calce aerea idrata sottraendo una parte di acqua al sistema. In condizioni normali, con una buona miscelazione della terra con la calce, ogni punto percentuale di calce viva aggiunto può far diminuire di circa un’unità percentuale il contenuto in acqua della terra

trattata.

Scambio ionico e flocculazione

Le particelle argillose recano in superficie ioni positivi (H^+ , Na^{2+} , K^+) che attraggono le molecole d’acqua. Questi vengono sostituiti dagli ioni calcio (Ca^{2+}) e magnesio (Mg^{2+}) provenienti dalla dissociazione della calce. In questo modo diminuisce la quantità di acqua che circonda le singole particelle argillose che si portano così reciprocamente a contatto. La diretta conseguenza di questo processo è la flocculazione e l’agglomerazione delle particelle disperse nell’acqua.

Reazione pozzolanica

Successivamente, agli elevati valori di pH dovuti alla presenza di calce, una parte dei minerali argillosi solubilizza e si combina con il calcio per dare origine a silico-alluminati idrati di calcio stabili dotati di un forte potere legante. Questo complesso di trasformazioni chimiche è comunemente conosciuto come reazione pozzolanica.

Conseguenze del trattamento sulle caratteristiche fisico-meccaniche

Distribuzione granulometrica

La flocculazione e l’agglomerazione delle particelle argillose prodotte dalla calce si manifesta con la diminuzione della frazione argillosa (CF) del materiale, che nel caso in esame è passata dal 26% al 12%.

Densità

L’agglomerazione delle particelle si traduce in un progressivo calo della massa volumica ed in un aumento dell’indice dei vuoti in funzione della percentuale di legante. Infatti dalle curve di costipamento (energia di 2685 kJ/m^3) eseguite sul terreno tal quale e sul terreno trattato si rileva che la densità secca massima passa da 1.85 Mg/m^3 a 1.75 Mg/m^3 . Tale fenomeno è accompagnato da un aumento del contenuto in acqua ottimale che passa dal 15.5% al 18.3%. A questi effetti si aggiunge “l’appiattimento” della curva di costipamento mostrata in Fig.1.

Plasticità

La calce migliora la lavorabilità del terreno in quanto aumenta il contenuto in acqua entro il quale esso presenta un comportamento solido. Questo è confermato dalla diminuzione dell’indice di plasticità del terreno, che tra prima e dopo il trattamento passa dal 22% al 16%, dovuto principalmente ad un aumento del limite di plasticità (da 28% a 31%).

Indice CBR

Poco dopo la miscelazione della terra con la calce è stato rilevato un valore dell’indice CBR immediato del 28% contro quello del terreno tal quale pari al 6%.

Successivamente esso evolve in funzione del tempo di maturazione come mostra la Fig.2.

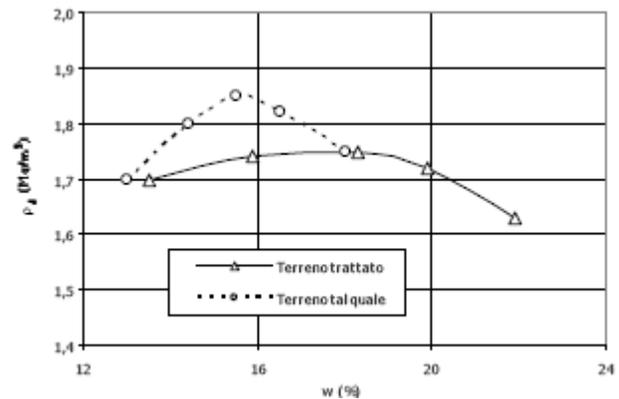


Figura 1 Curve di costipamento. *Compaction curves.*

Lo scambio ionico porta il terreno ad essere praticamente insensibile al contatto con l’acqua come dimostra la drastica riduzione del rigonfiamento lineare che passa dal 2.7% al 0.1% rispettivamente per il terreno prima e dopo 7 giorni dal trattamento. Tutti i provini sono stati preparati per costipamento con energia di 2685 kJ/m^3 e contenuto in acqua prossimo a quello ottimale.

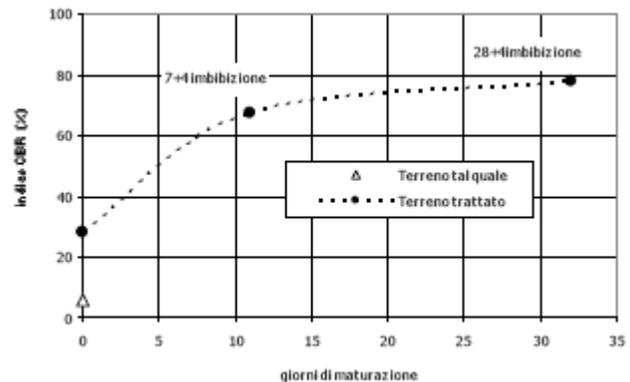


Figura 2 Evoluzione dell’indice CBR. *CBR Index evolution.*

Resistenza a compressione

Gli effetti del legante si riflettono anche sulla resistenza a compressione, che passa da 706kPa dopo un giorno di maturazione a 1785kPa dopo 28 giorni, e sulla deformabilità come è indicato in Fig.3. I provini sono stati preparati con le stesse modalità descritte per la prova CBR.

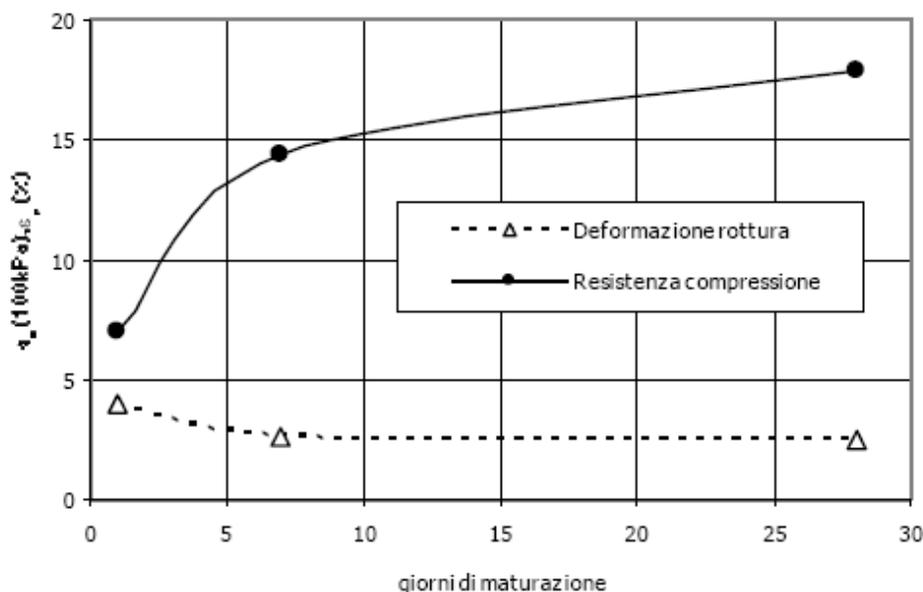


Figura 3 Evoluzione della resistenza a compressione e della deformazione a rottura. *Unconfined compressive strength and failure deformation evolution.*

Conseguenze del trattamento a reazioni pozzolaniche avvenute

Concetti basilari

Grazie ai tradizionali lavori di Hvorslev (1937) e Roscoe, Schofield & Wroth (1958) è possibile definire la superficie di stato limite di un terreno, fondamentale per comprenderne il comportamento meccanico. Questa ne delimita i possibili stati tensionali e risulta costituita dalla superficie di Roscoe, dalla superficie di Hvorslev e dal piano a trazione nulla.

Tale superficie è descritta in termini di tre parametri (v , p' , q), ma è possibile ricavarne una rappresentazione bidimensionale se si fa riferimento ai parametri normalizzati p'/p'_e e q/p'_e (Roscoe & Burland, 1968) dove p'_e rappresenta la pressione isotropa valutata sull'omonima curva di consolidazione vergine in corrispondenza del valore corrente del volume specifico.

Questa pressione è definita equivalente ed è esprimibile nella forma

$$p'_e = \exp[(N-v/\lambda)]. \quad [1]$$

Il fatto che tale normalizzazione porti ad un'unica superficie di stato limite indica che sezioni della stessa operate da piani a volume costante hanno tutte la stessa forma e posizione, ma diversa dimensione.

L'equazione della superficie di Roscoe è descritta analiticamente dell'equazione

$$p'/p'_e = [M^2/(M^2 + \eta^2)]^{(1-\kappa/\lambda)}, \quad [2]$$

funzione dell'angolo di resistenza al taglio allo stato critico ($M = f(\phi'_{cs})$) e del rapporto di irreversibilità ($1-\kappa/\lambda$).

Questa sopravvaluta i possibili stati tensionali per un terreno che si trova alla sinistra della linea di stato critico (CSL) che saranno limitati dalla superficie di Hvorslev e dal piano a trazione nulla. La rappresentazione analitica di questa superficie è

$$q/p'_e = g + h(p'/p'_e), \quad [3]$$

quindi risulta che

$$q = (M-h) \exp[(\Gamma-v)/\lambda] + hp' \quad [4]$$

in virtù del fatto che la CSL appartiene alla superficie di Hvorslev. Tale superficie è però più accuratamente espressa da un'equazione del tipo

$$q/p'_e = \alpha (p'/p'_e)^\beta, \quad [5]$$

e quindi la sua rappresentazione nel piano $\ln p'/p'_e$, $\ln q/p'_e$ è ben schematizzabile da una retta.

Prove eseguite

Le nozioni teoriche brevemente introdotte sono ben applicabili a terreni non strutturati, nei quali cioè i legami interparticellari sono trascurabili, ma sono utili anche per quantificare l'effetto legante della calce.

Infatti tramite la normalizzazione proposta, eliminando il contributo dell'indice dei vuoti, si può quantificare l'entità dei legami tra le particelle di terreno.

A tal fine sono state eseguite, in un primo momento, delle prove triassiali C.I.U. (compressione per carico), prove di compressione isotropa e prove edometriche I.L. sia sul terreno tal quale che sul terreno trattato ricostruiti a partire da un volume specifico prossimo a quello che corrisponde al limite di liquidità con lo scopo di determinare i parametri che definiscono le curve di consolidazione vergine isotropa e monodimensionale (VCL)

e definire in maniera completa forma e dimensione delle superfici di stato intrinseche.

Successivamente alcuni provini di terreno trattato e strutturato, cioè confezionati per costipamento con energia di 2685 kJ/m^3 e con contenuto in acqua prossimo a quello ottimale, sono stati testati, passato circa un mese dal trattamento, con prove triassiali C.I.U., prove edometriche I.L. e prove di taglio diretto.

Presentazione e discussione dei risultati

Come mostrano la Fig.4 e la Fig.5 la calce ha un duplice effetto infatti, a prescindere dalla cementazione, modifica la forma della superficie di stato intrinseca in accordo con l'equazione [2] in quanto M subisce un notevole incremento, passando da 1.01 ad 1.46, così come h .

Il trattamento a calce modifica quindi la natura del terreno come è testimoniato dall'aumento considerevole dell'angolo di resistenza al taglio allo stato critico e confermato dalla sensibile diminuzione di λ , κ , N , C_c , C_s e e_0 e da un aumento di α e β . L'effetto legante si traduce invece in un evidente aumento della dimensione della superficie di stato limite.

Sempre in Fig.4 è mostrato il percorso di carico di un provino di terreno trattato-strutturato in cui si evidenzia l'aumento repentino della pressione neutra una volta raggiunto il punto, individuato dal crollo del deviatore, in cui i legami tra le particelle di terreno vengono distrutti denunciando così un volume specifico elevato del materiale. In questo caso la CSL non appartiene più al luogo dei punti a rottura (η_{max}), alcuni dei quali cadono alla sinistra del piano a trazione nulla a conferma dell'avvenuta cementazione.

In Fig.6 è rappresentato un involuppo di rottura del terreno trattato-strutturato determinato mediante l'apparecchio di taglio diretto. Nonostante le limitazioni proprie di tale apparecchiatura i risultati ottenuti ($c' = 51 \text{ kPa}$; $\phi' = 37^\circ$) sono confrontabili con quelli determinati con la prova triassiale. Il vantaggio, a parte i tempi di esecuzione più ridotti, sta nel fatto che è più facile preservare l'integrità dei provini in quanto la loro preparazione non richiede le stesse attenzioni.

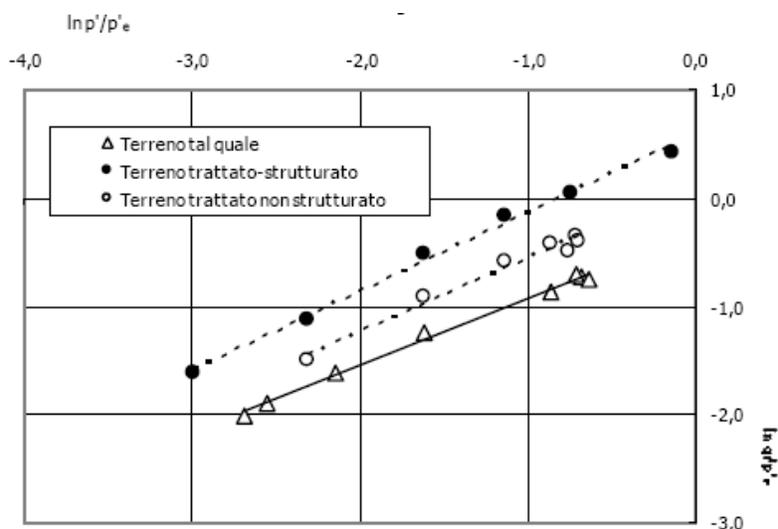


Figura 4 Superfici di stato limite. Boundary surfaces.

Per quanto riguarda la deformabilità, la Fig.7 mostra in un piano bilogarithmico l'andamento del modulo di taglio (G), riferito al 1% di deformazione assiale normalizzato tramite p' di consolidazione, in funzione della pressione equivalente anch'essa normalizzata. Come si può notare, a parità di condizioni, il terreno trattato-strutturato presenta valori di G decisamente superiori rispetto al tal quale a testimonianza dell'aumento di rigidezza dovuto al legante.

Dal momento in cui la curva di consolidazione edometrica del terreno trattato-strutturato interseca la VCL (Fig.8) questo si trova in una condizione metastabile in quanto riesce a sostenere uno stato tensionale che non è compatibile con il proprio volume specifico. Infatti il

materiale si trova in uno stato che non potrebbe raggiungere senza il contributo di forti legami interparticellari.

La pressione di preconsolidazione, meglio definita come tensione verticale efficace di "snervamento" o di plasticizzazione σ'_{vy} , è pari a 763 kPa e rappresenta la tensione normale alla quale il percorso di carico di una prova edometrica interseca la superficie di plasticizzazione corrispondente alla superficie di stato (Y3).

Questa è individuata dall'intersezione della superficie di stato limite con la "parete elastica" che rappresenta il luogo dei punti compresi tra le superficie di stato e il cilindro avente come direttrice la curva di rigonfiamento e come generatrice una retta parallela all'asse q .

Se il rapporto κ/λ è molto piccolo, come in questo caso, la superficie di stato è praticamente coincidente con la superficie di plasticizzazione rappresentata dall'ellisse di Burland di equazione

$$p'/p'_c = M^2/(M^2 + \eta^2) \quad [6]$$

dove p'_c rappresenta l'intersezione della superficie di plasticizzazione con l'asse p' .

Ovviamente questo è corretto solo per terreni non strutturati, nei quali cioè quando $p'/p'_c = 1$ anche il rapporto p'/p'_c coincide con l'unità. Questi non possono mai trovarsi in uno stato al di fuori della superficie di stato limite intrinseca a differenza dei terreni che presentano legami interparticellari forti.

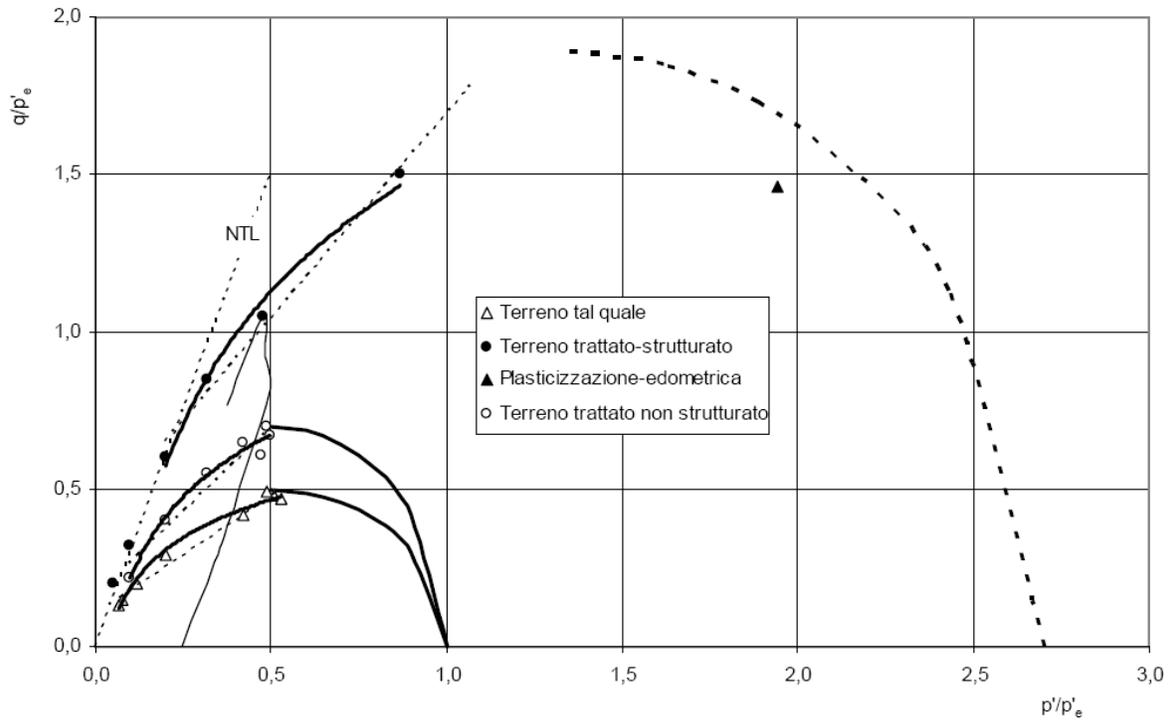


Figura 5 Involuppo di rottura nel piano $p'/p'_e, q/p'_e$.
Strength envelope on the $p'/p'_e, q/p'_e$ plane.

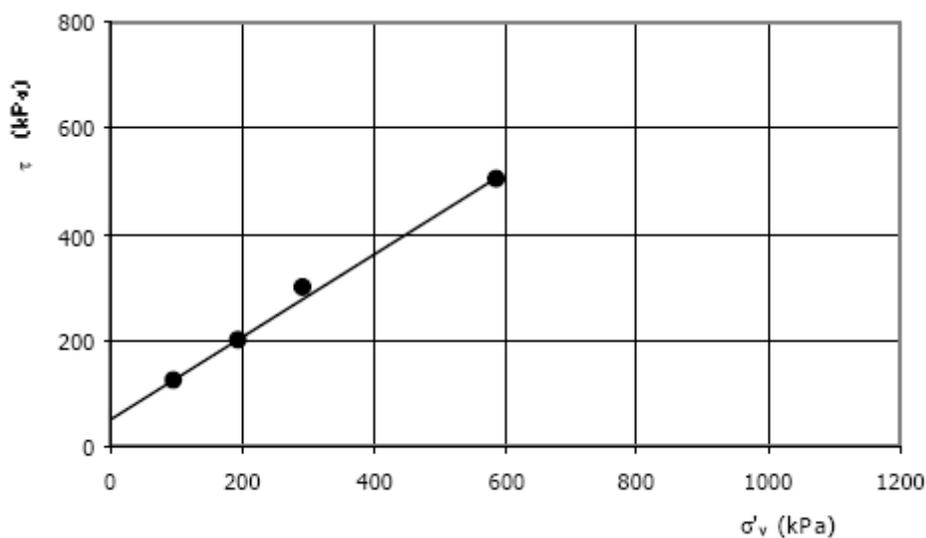


Figura 6 Involuppo di rottura del terreno trattato-strutturato.
Strength envelope

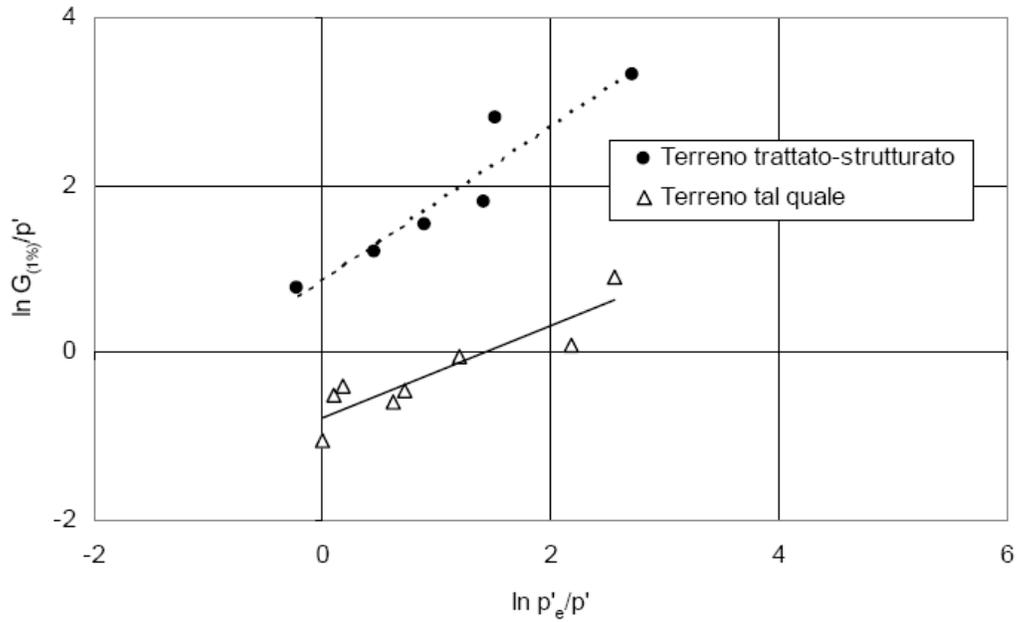


Figura.7 Modulo di taglio normalizzato.
Normalized shear modulus.

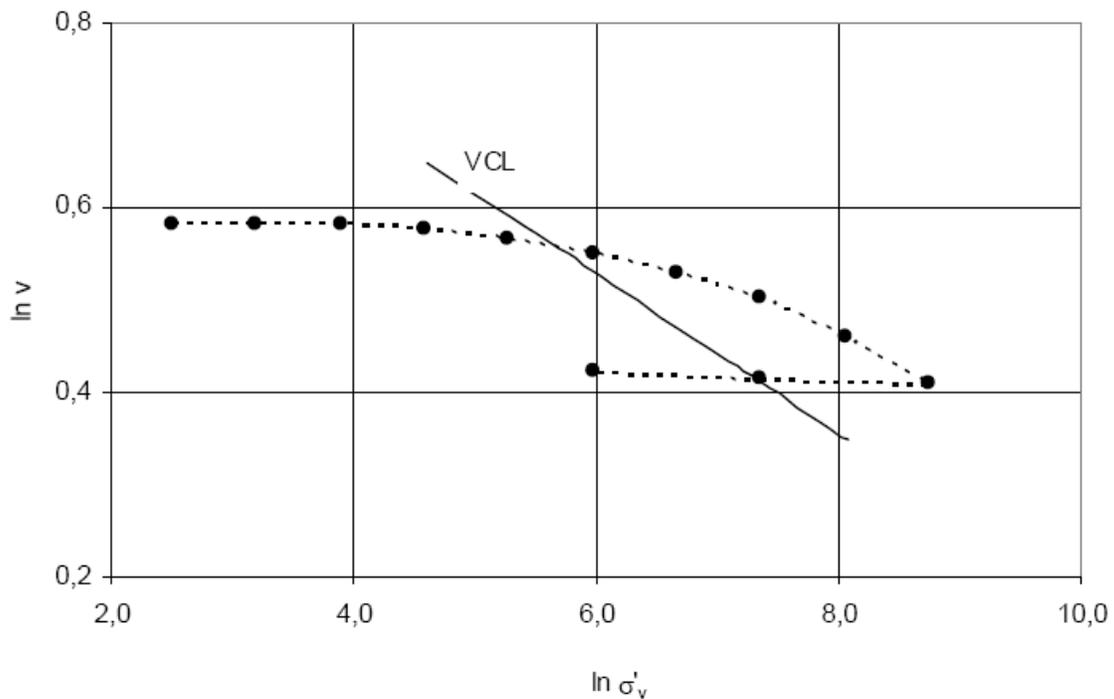


Figura 8 Curva di consolidazione edometrica del terreno trattato-strutturato.
One-dimensional compressive curve.

Per quantificare questi legami, come suggerito da Burland et al. (1996), si può utilizzare il rapporto tra la tensione verticale efficace di plasticizzazione e quella valutata sulla VCL (σ'_c) in corrispondenza del volume specifico al quale è avvenuta la plasticizzazione (v_y) stessa.

Questo rapporto è risultato essere pari a 2.70.

In mancanza di prove più idonee e accurate, è stata utilizzata la prova edometrica per cercare di valutare la dimensione della parte destra della superficie di stato limite del terreno trattato-strutturato. Ipotizzando, nel momento in

cui il terreno plasticizza, un coefficiente di spinta a riposo (k_0) pari a 0.5 è stato rappresentato il punto che localizza il fenomeno nel piano p'/p'_e , q/p'_e (Fig.4). Volendo essere rigorosi questo punto dovrebbe appartenere alla superficie di plasticizzazione, ma visto che il rapporto κ/λ è di piccola entità possiamo supporre che, almeno sperimentalmente, le differenze tra le due superfici siano trascurabili in accordo con l'equazioni [2] e [5]. Moltiplicando le coordinate di ogni punto che rappresenta la superficie di Roscoe del terreno trattato per il rapporto σ'_{vy}/σ'_e si è ottenuta una buona corrispondenza con il risultato ottenuto dalla prova edometrica.

Quindi tale rapporto quantifica l'entità dei legami tra i granuli e conseguentemente consente di trarre indicazioni, almeno in primissima approssimazione, sulla dimensione della superficie di stato limite.

E' bene precisare che, anche a reazioni pozzolaniche

avvenute, all'aumentare del tempo di maturazione si continua ad assistere ad una continua evoluzione dell'entità dei legami anche se con una velocità sempre più trascurabile.

Conclusioni

Questo lavoro costituisce un modesto tentativo di rappresentare ed interpretare il comportamento meccanico dei terreni trattati con CaO in maniera tale da poterlo rapportare e confrontare con le teorie fondamentali della meccanica delle terre.

Infatti gli studi sui rilevati stradali generalmente vengono condotti attraverso prove "speditive" con le quali, per forza di cose, non si possono apprezzare alcuni aspetti di fondamentale importanza sia teorica che pratica.

Bibliografia

- Burland, J.B., Rampello, S., Georgiannou, V.N. and Calabresi, G., 1996. "A laboratory study of the strength of four clays". *Geotechnique* 46 (3), 491-514.
- Hvorslev, M.J., 1937. "On the strength properties of remoulded cohesive soils". Thesis, Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, Ingeniørvidenskabelige Skrifter, Copenhagen.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N., Wroth, C.P., 1958. "On the yielding of soils". *Geotechnique* 8 (1), 22-53.
- Roscoe, K.H., Burland, J.B., 1968. "On the generalized behaviour of wet clay". *Engineering Plasticity*, ed. Heyman and Leckie, Cambridge University, 535-609.